

PA 1254356

THE UNITED STATES OF AMERICA**TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME:****UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE****United States Patent and Trademark Office****December 02, 2004**

THIS IS TO CERTIFY THAT ANNEXED HERETO IS A TRUE COPY FROM THE RECORDS OF THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE OF THOSE PAPERS OF THE BELOW IDENTIFIED PATENT APPLICATION THAT MET THE REQUIREMENTS TO BE GRANTED A FILING DATE UNDER 35 USC 111.

APPLICATION NUMBER: 60/528,216**FILING DATE: December 10, 2003**

REC'D 17 JAN 2005

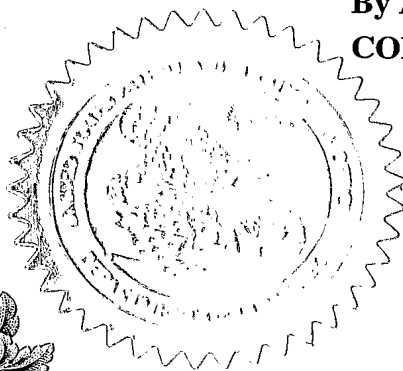
WIPO

PCT

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

**By Authority of the
COMMISSIONER OF PATENTS AND TRADEMARKS**


N. WOODSON**Certifying Officer**



121003

13281 U.S. PTO

OLIFF & BERRIDGE, PLC
P.O. Box 19928
Alexandria, Virginia 22320
Telephone: (703) 836-6400
Facsimile: (703) 836-2787

PROVISIONAL PATENT APPLICATIONATTORNEY DOCKET NO.: 118034DATE: December 10, 2003**MAIL STOP PROVISIONAL PATENT APPLICATION**

Customer Number: 25944

**PROVISIONAL PATENT APPLICATION
RULE §1.53(c)**

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

Transmitted herewith for filing under 37 CFR §1.53(c) is the provisional patent application of

FIRST INVENTOR: Daniel KOPF

RESIDENCE: Altach, Austria
(City and Either State or Foreign Country)

SECOND INVENTOR: Maximilian Josef LEDERER

RESIDENCE: Alberschwende, Austria
(City and Either State or Foreign Country)

THIRD INVENTOR: Uwe MORGNER

RESIDENCE: Neuburg/ Rhein, Germany
(City and Either State or Foreign Country)

FOR (TITLE): DIODE-PUMPED FEMTOSECOND LASER OSCILLATOR WITH CAVITY DUMPING

- ☒ Formal drawings (Figs. 1-3; sheets 2) are attached.
- ☒ This patent application is assigned to HIGH Q LASER PRODUCTION GmbH.
☐ The executed Assignment is filed herewith.
- ☐ Entitlement to small entity status is hereby asserted.
- ☒ Check No. 149136 in the amount of ☐ \$80.00 ☒ \$160.00 to cover the filing fee is attached.
Except as otherwise noted herein, the Commissioner is hereby authorized to charge payment of any additional filing fees required under 37 C.F.R. §1.16 or credit any overpayment to Deposit Account No. 15-0461. Two duplicate copies of this sheet are attached.

Respectfully submitted,

James A. Oliff
Registration No. 27,075

Thomas J. Pardini
Registration No. 30,411

JAO:TJP/amo

22581 U.S. PTO
60/528216
121003

Diode-pumped femtosecond laser oscillator with cavity dumping

Die Erfindung betrifft ein diodengepumptes Lasersystem nach dem Prinzip der Puls-Auskopplung zur Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen.

Bekannte Femtosekundenlasersysteme werden zwar in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt, wie z.B. Materialverarbeitung, Mikroskopie, Biomedizin oder der Herstellung photonischer Komponenten. Allerdings ist der Einsatz ausserhalb eines Laborbetriebs oft problematisch, da die Laser-Systeme eine grosse Komplexität und einen hohen Handhabungsaufwand bedingen. Zusätzlich zur hohen Energie der Femtosekundenpulse spielt für den industriellen Einsatz insbesondere die Kompaktheit der Lasersysteme eine wesentliche Rolle.

Laseranordnungen nach dem Prinzip der Pulsauskopplung oder des Cavity-Dumpers erlauben die Erzeugung von Pulsen, welche für die Anwendung im Bereich der Mikrostrukturierung erforderliche Energien bzw. Pulsspitzenleistungen besitzen. Dabei kann auf die Verwendung von komplexen Verstärkeranordnungen verzichtet werden, was zu einem kompakten Aufbau führt.

Ein Lasersystem nach dem Prinzip des Puls-Auskopplers oder Cavity Dumpers mit Pulsenergien von bis zu 100 nJ ist beispielsweise aus M. Ramaswamy, M. Ulman, J. Paye, J.G. Fujimoto, „Cavity-dumped femtosecond Kerr-lens mode-locked Ti:Al₂O₃ laser“, Optics Letters, Vol. 18, No. 21, 1. November 1993, Seiten 1822 bis 1824 bekannt. Dieses Dokument wird als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen

betrachtet. Ein modengekoppelter $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ Laser wird zur Erzeugung von 50 Femtosekunden-Pulsen mit einer Energie von 100 nJ bzw. Pulsspitzenleistungen von 0,1 MW und einer einstellbaren Rate bis zu 950 kHz mit einem akusto-optischen Schalter als Cavity-Dumper betrieben. Der Schalter selbst besteht aus einer Quarz-Zelle, auf die im Brewster-Winkel der Laserstrahl mit einem Spiegel fokussiert wird. Zum Pumpen wird ein Argon-Laser und zur Dispersionskompensation eine nachgelagerte Strecke mit 4 Prismen verwendet.

In A. Baltuška, Z. Wie, M.S. Pshenichniko, D.A. Wiersma, Robert Szipöcs, „All-solid-state cavity-dumped sub-5-fs-laser“, Appl. Phys. B 65, 1997, Seiten 175 bis 188 ist ein Festkörper-Lasersystem beschrieben, mit dem nach dem Prinzip des Cavity-Dumpers Laserpulse einer Dauer von unter 5 Femtosekunden erzeugt werden. Dieses Dokument wird als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet. Das verwendete Ti:Saphir-Lasermedium wird durch einen wiederum diodengepumpten, frequenzverdoppelten Festkörperlaser mit Nd:YVO_4 als Lasermedium gepumpt. Die Ausbildung als Cavity-Dumper erfolgt durch eine Bragg-Zelle als akusto-optischen Schalter. Diese Anordnung erfordert ein sorgfältiges Design der Kavität, damit eine Modenkopplung durch Kerr-Linseneffekt nicht bereits durch die Dispersion des akusto-optischen Modulators gestört wird. Eine mögliche Verwendung von elektro-optischen Modulatoren wird erwähnt, wobei allerdings deren Beschränkung auf erzielbare Repetitionsraten von ungefähr 10 kHz hervorgehoben wird. Mit dem beschriebenen Lasersystem sollen sub-5-fs-Pulse mit einer Pulsspitzenleistung von 2 Megawatt und einer Repetitionsrate von 1 MHz realisiert werden.

Einen hochrepetierenden Laser mit Cavity-Dumping und einem elektro-optischen Schalter beschreibt E. Krüger in „High-repetition-rate electro-optic cavity dumping“, Rev. Sci. Instrum. 66 (2), Februar 1995, Seiten 961 bis 967. Dieses Dokument wird als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet. Als Basis der Anordnung dient ein durch einen Argon-Laser synchron gepumpter modengekoppelter Farbstofflaser, wobei als Schalter eine LM 20 Pockels-Zelle aus zwei deuterierten KD*P-Kristallen mit einem Dünnschichtpolarisator Verwendung finden. Das Lasermedium besteht aus einer Lösung von Rhodamin 6G in Ethylenglykol. Die erzeugten Pulse besitzen eine Dauer von 15 Nanosekunden bei einer mittleren ausgekoppelten Leistung von 75 mW und einer Repetitionsrate von 10 MHz.

Ein Laser nach dem Cavity-Dumper-Prinzip mit elektro-optischem Schalter zeigt V. Kubecek, J. Biegert, J.-C. Diels, M.R. Kokta, „Practical source of 50 ps pulses using a flashlamp pumped Nd:YAG laser and passive all-solid-state pulse control“, Optics Communications 177 (2000), Seiten 317 bis 321. Dieses Dokument wird als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet. Ein Nd:YAG-Lasermedium wird durch eine Blitzlampe gepumpt. Als elektro-optischer Schalter findet eine Pockels-Zelle mit dielektrischem Polarisator Verwendung. Die erzielbaren Energien der 50-Pikosekunden-Pulse werden mit 300 μ J bei Repetitionsraten von 5 Hz angegeben, wobei eine Kompression einzelner Pulse innerhalb der Kavität erfolgt.

Ti:Al₂O₃-Laser liegen damit in den erzielbaren Pulsspitzenleistungen zwar über den Farbstofflasern. Allerdings wird die erreichbare Pulsenergie durch die Verwendung der akusto-optischen Modulatoren eingeschränkt,

da für diese der Effekt der Selbstphasenmodulation wegen der benötigten kleinen Fokusse zu hoch wird, was in Pulsinstabilitäten oder auch Zerstörung des Modulatormaterials resultieren kann. Ausserdem erfolgt bei Farbstofflasern eine zeitliche Degradation des Lasermediums und das Pumpen durch Blitzlampen oder Festkörperlaser führt zu komplexen Systemen.

Gattungsgemässe Lasersysteme des Stands der Technik sind somit durch ihren Aufbau und die verwendeten Komponenten zu komplex und/oder in der erreichbaren Pulsenergie limitiert bzw. erreichen keine Pulsdauern im Femtosekundenbereich.

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Bereitstellung eines kompakten Lasersystems, insbesondere eines diodengepumpten Lasersystems nach dem Prinzip der Pulsaukopplung, welches Femtosekundenpulse mit einer Repetitionsrate grösser als 10 kHz und Pulsenergien über 100 nJ erzeugt.

Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung eines kompakten Lasersystems, insbesondere ohne Elemente zur Pulsverstärkung ausserhalb der Kavität, mit einer Pulsspitzenleistung grösser als 1 MW bei einer Repetitionsfrequenz grösser als 10 kHz.

Die Erfindung betrifft ein Lasersystem nach dem Prinzip der Pulsaukopplung, bei dem ein diodengepumpter Femtosekunden-Oszillator mit einem elektro-optischen Modulator als Schalter betrieben wird.

Ein Vorteil des EOM im Vergleich zum AOM besteht darin, dass der EOM mit sehr grossen Strahlquerschnitten betrieben

werden kann (z. B. $d = 700\mu\text{m}$), so dass höhere Energien möglich sind. Damit kann vermieden werden, dass es bei den zu erzeugenden Pulsleistungen bzw. Pulsenergien im Schalter zu exzessiver Selbstphasenmodulation (SPM) oder gar Zerstörung kommt. Ein SiO_2 -AOM benötigt hingegen typischerweise $d < 50\mu\text{m}$ bei einer Modulatorlänge von 3 mm, um die gleiche Schalteffizienz und Schaltflankenkurze zu erreichen. Es sind zwar längere Modulatorzellen erhältlich bei welchen die Fokusse grösser gehalten werden können. Jedoch verringert sich dabei wegen der Zunahme der Wechselwirkungslänge die angesammelte nichtlineare Phase nicht merklich.

Wollte man nun z. B. am Ausgang des Pulsauskopplers Femtosekundenpulse mit 1 μJ Energie und 200 fs Pulsbreite erzeugen, so müsste innerhalb der Kavität typischerweise eine Pulsenergie von 2 μJ vorliegen. Diese Forderung resultiert aus der Notwendigkeit, dass der Betrieb des cavity dumped Lasers quasi-stationär sein muss, was bei hohen Repetitionsraten und Auskoppelgraden von $> 50\%$ schwierig zu erreichen ist. Bei den genannten Querschnitten und Leistungen im AOM liesse sich aufgrund der Solitonenbedingung

$$|\beta_2| = \frac{\tau_{FWHM} \cdot E \cdot \kappa}{3,526} \quad (1)$$

mit

$$\kappa = \frac{4 \cdot l_{AOM} \cdot n_2}{\lambda_0 \cdot \omega_0^2} \quad (2)$$

ein 200 fs Soliton bei 1 μm Wellenlänge nur stabilisieren, wenn die hohe negative Netto-Dispersion von ca. -40000 fs^2 in den Resonator eingebracht werden würde. Hierbei bezeichnet

- β_2 die resonatorinterne negative Nettodispersion,
- τ_{FWHM} die Halbwertsbreite der sech^2 -Solitonen,
- E die Pulsenergie,
- κ den Selbstphasenmodulationsparameter,
- l_{AOM} die einfache Länge des akusto-optischen Modulators,
- n_2 den vom Kerr-Effekt herrührenden nichtlinearen Brechungsindex,
- λ_0 die Vakuumwellenlänge und
- ω_0 den Strahlradius im AOM.

Darüber hinaus verbleiben bei Vorliegen einer solchen Dispersion immer noch Probleme, da bei einmaligem Durchgang ein zu hoher Chirp entsteht und die Pulsparameter sich während eines Resonatorumlaufs zu stark ändern. Dies hat zur Folge, dass ein stationärer Solitonbetrieb nicht möglich ist und in der Regel dispersive Strahlung im Resonator entsteht, welche dann zum Mehrfachpulsen oder dynamischer Unstabilität führt. Als Mass für eine diesbezügliche Neigung des Lasers lässt sich z. B. das

Verhältnis r der Resonatorperiode und der Solitonenperiode definieren.

$$r = \frac{E \cdot \kappa \cdot 1,763}{\pi \cdot \tau_{FWHM} \cdot 1,134} \quad (3)$$

Für den stabilen Betrieb sollte dieses Verhältnis $\ll 1$ sein. Im obigen Fall läge der Wert bei ca. 3, was eindeutig zu hoch ist. Die Grundlage dieser Berechnung kann F. Krausz, M.E. Fermann, T. Brabec, P.F. Curly, M. Hofer, M.H. Ober, C. Spielmann, E. Wintner, und A.J. Schmidt "Femtosecond Solid-State Lasers" in IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 28, No. 10, Seiten 2097-2120, Oktober 1992 entnommen werden. Dieses Dokument wird als durch Referenzierung in diese Anmeldung einbezogen betrachtet.

Für ein Femtosekunden-Lasersystem nach dem Prinzip der Pulsaukopplung ist daher die Pulsenergie mit einem EOM einfacher skalierbar als mit einem AOM.

Die durch den EOM generierte Dispersion kann für typische Modulatormaterialien (z. B. BBO) und -längen relativ einfach durch eine Folge von dispersiven Komponenten, z.B. Spiegel, in der Kavität kompensiert werden. Die Anzahl der dispersiven Spiegel wird durch die zu kompensierende positive Dispersion in der Kavität, zu der alle Spiegel, das Lasermedium, der Dünnschichtpolarisator und der BBO-EOM mit einem Hauptanteil beitragen, sowie durch die Solitonenbedingung bestimmt. Letztere besagt, dass für eine bestimmte umlaufende Pulsenergie, einen Parameter der Selbstphasenmodulation und einer zu erzielenden Pulsbreite eine bestimmte negative Netto-Dispersion in der Kavität herrschen muss. Aufgrund der hohen Strahlquerschnitte,

welche beim EOM-Schalter möglich sind, wird der Parameter κ der Selbstphasenmodulation nur bestimmt durch den Strahlquerschnitt im Lasermedium und dessen nichtlinearen Brechungsindex n_2 .

Zur Dispersionskompensation können dispersive Spiegel, z.B. Gires-Tournois-Interferometer, Verwendung finden, die somit zur Kompensation der positiven Dispersion in der Kavität und zur Erfüllung der Solitonenbedingung dienen.

Mit einer solchen Ausgestaltung eines Lasersystems nach dem Prinzip der Pulsauskopplung wurden Femtosekundenpulse mit einer Repetitionsfrequenz bis zu 200 kHz und einer Pulsenergie von 400 nJ und damit mehr als 1 MW Leistung erzeugt. Das Lasersystem wird dabei unter Verwendung der dispersiven Spiegel und eines sättigbaren Absorberspiegels modengekoppelt betrieben.

Ein Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemässes Lasersystem wird nachfolgend schematisch dargestellt und rein beispielhaft näher beschrieben. Im einzelnen zeigen

Fig.1 die Darstellung eines erfindungsgemässen Lasersystems;

Fig.2 die Darstellung des Verlaufs der Pulsenergie innerhalb der Kavität in Zeitabhängigkeit für eine Repetitionsfrequenz von 15 kHz und

Fig.3 die Darstellung des Verlaufs der Pulsenergie innerhalb der Kavität in Zeitabhängigkeit für eine Repetitionsfrequenz von 173 kHz.

In Fig.1 wird ein erfindungsgemässes Lasersystem nach dem Prinzip der Pulsauskopplung dargestellt. Das Lasersystem basiert auf einer gefalteten Kavität in an sich bekannter Ausführungsform. Als Lasermedium 11 wird Ytterbium gedoptes LG760 Glas verwendet, das mit einer mit 976 nm emittierenden Pumpdiode 9 über eine Kombination von zwei achromatischen Linsen 10 gepumpt wird. Die Linsen 10 besitzen Brennweiten von 30 mm bzw. 75 mm. Durch einen sättigbar absorbierenden Spiegel 14 und dispersive Spiegel 6a-d, 7a-g, 8a-i zur Erzeugung der notwendigen negativen Dispersion wird eine Soliton-Modenkopplung bewirkt. Zur Vermeidung der exzessiven Selbstphasenmodulation eines akusto-optischen Modulators wird eine Beta-Barium-Borat (BBO)-Pockels-Zelle als elektro-optisches Element 1 zusammen mit einem Dünnschichtpolarisator 4 zur Pulsauskopplung verwendet, welches über eine Hochspannungsversorgung 2 und einen Rechner als Schaltsignalgenerator 3 geschaltet wird. In Abhängigkeit von der an das elektro-optische Element 1 angelegten Spannung wird die Polarisationssebene eines Laserstrahls gedreht, so dass der Dünnschichtpolarisator 4 passiert werden kann. Durch die Schaltung können damit Pulse aus der Kavität ausgekoppelt werden.

In der Kavität baut sich ein Puls aus dem Rauschen oder einem von einem vorhergehenden Puls verbliebenen Strahlungsfeld auf und wird bei jedem Durchgang durch das Lasermedium 11 verstärkt, wobei mehrfache Reflexionen an den dispersiven Spiegeln 6c-d, 7a-g, 8a-i erfolgen. Nach einer gewissen Anzahl von Resonatorumläufen und Durchgängen durch das verstärkende Lasermedium 11 wird der Puls durch eine Rotation der Polarisation mittels Schalten des elektrooptischen Elements 1 über den Dünnschichtpolarisator

4 als Laserpuls ausgekoppelt. Diese Anordnung stellt lediglich ein Ausführungsbeispiel für eine Laseranordnung nach dem Prinzip der Pulsauskopplung dar.

Die einzelnen Komponenten der Laseranordnung in Fig.1 sind wie folgt bezeichnet

- | | |
|------|----------------------------------|
| 1 | elektro-optisches Element |
| 2 | Hochspannungsversorgung |
| 3 | Schaltsignalgenerator |
| 4 | Dünnschichtpolarisator |
| 5 | Hochreflektor |
| 6a-d | Dispersiver Planar-Spiegel |
| 7a-g | Dispersiver Planar-Spiegel |
| 8a-i | Dispersiver gekrümmter Spiegel |
| 9 | Pumpdiode |
| 10 | Achromatische Linse |
| 11 | Lasermedium |
| 12 | Photodiode |
| 13 | Doppelbrechender Filter |
| 14 | Sättigbar absorbierender Spiegel |

Fig.2 und Fig.3 zeigen den Verlauf der Pulsenergie innerhalb der Kavität in Zeitabhängigkeit. Durch das erfindungsgemäße Lasersystem können Repetitionsraten der Auskopplung bis zu 200 kHz erzielt werden, wobei der Kontrast zwischen ausgekoppelten Pulsen und den schwachen Hintergrund-Pulsen besser als 1:1000 ist. Als Pulsenergien werden mehr als 400 nJ erreicht, was Pulsspitzenleistungen von mehr als 1 MW entspricht. Die spektrale Breite des Ausgangs liegt bei 4 nm und die Dauer der ausgekoppelten Pulse beträgt ca. 300 fs, was durch Autokorrelation bestimmt wurde. Damit resultiert ein Zeit-Bandbreiten-

Produkt von 0,33, was nahe an der Fourier-Grenze liegt. Fig.2 und Fig.3 zeigen typische Verläufe der Relaxation zwischen den Pulsaukopplungen. Fig.2 zeigt den Verlauf bei einer Repetitionsrate von 15 kHz und Fig.3 bei 173 kHz. In Fig.2 wird dabei nach jeder Auskopplung wieder ein stationärer Zustand erreicht, wobei die Relaxationsschwingung stark gedämpft ist, was mit der Soliton-Pulsdynamik erklärt werden kann. In Fig.3 erfolgt die Auskopplung noch während des Aufbaus des Strahlungsfeldes und damit vor Erreichen eines stationären Zustands.

Es versteht sich, dass das dargestellte Lasersystem ein Ausführungsbeispiel von vielen erfindungsgemäss realisierbaren Ausführungsformen darstellt und der Fachmann alternative Realisierungsformen des Laseraufbaus, z.B. unter Verwendung anderer Resonatoranordnungen, Resonatorkomponenten oder Pumpverfahren, wie z. B. Scheibenlaser (Thin-Disk-Laser), ableiten kann. Insbesondere ist es möglich, die Schalt- und/oder Regelelemente über die angegebenen Beispiele hinaus anders zu gestalten, beispielsweise durch Verwendung alternativer dispersiver Komponenten oder anderer elektro-optischer Elemente, welche auch höhere Repetitionsraten realisierbar machen.

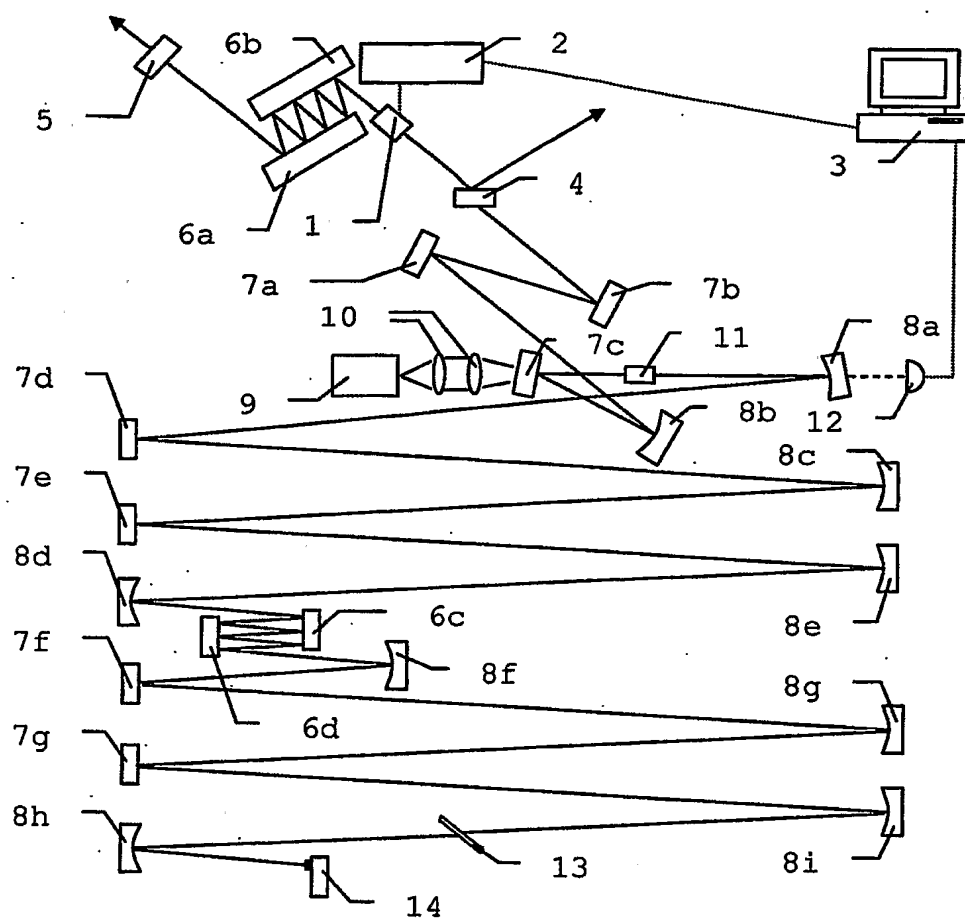


Fig. 1

BEST AVAILABLE COPY

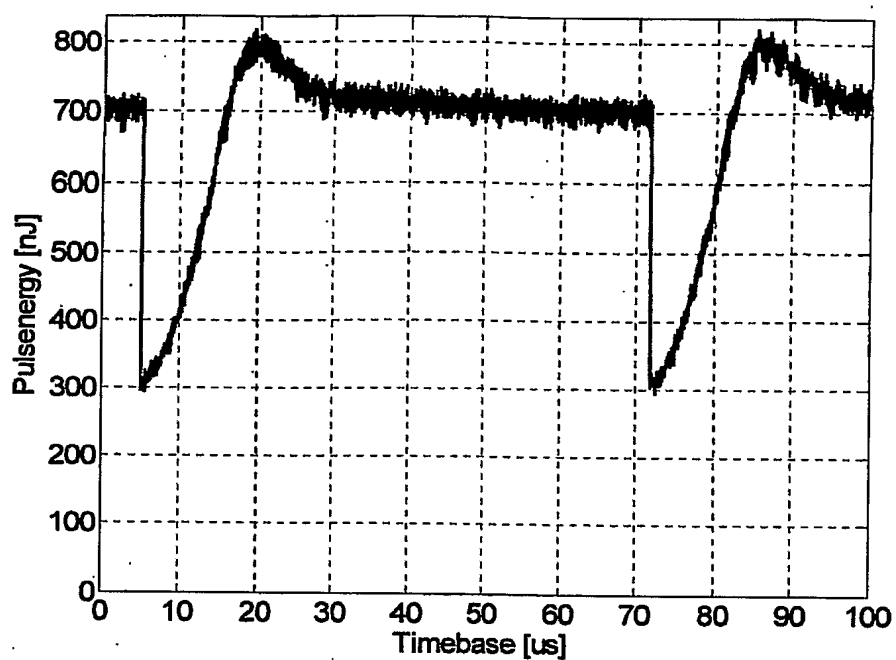


Fig. 2

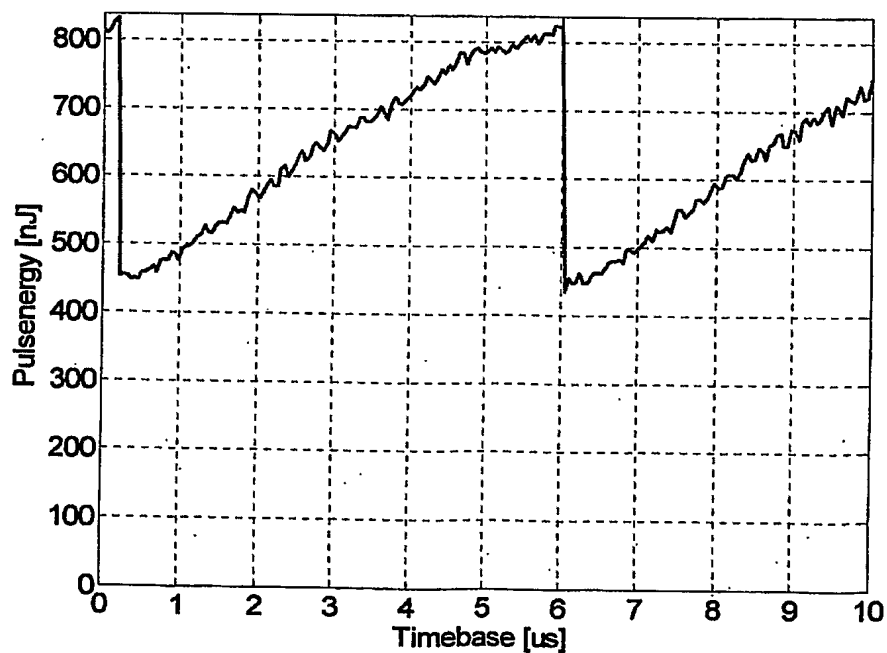


Fig. 3